

کمانش پوسته استوانه‌ای با گشودگی مستطیلی شکل تحت توزیع یکنواخت دما

میثم فرزاد کیا^۱، مهناز ذاکری^۲، محمد همایون صدر^۳، شاهرخ شمس^۴

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۲- استادیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۳- هیئت علمی، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۴- استادیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه تهران، دانشکده علوم و فنون نوین، تهران خیابان کارگر شمالی

چکیده

پوسته‌های استوانه‌ای به دلیل کاربردهای فراوان در صنعت همواره مورد توجه بوده‌اند. بوستر یا بدنه موشک‌ها و لوله‌های انتقال گاز از جمله مثال‌های پرکاربرد آنهاست. در تحقیقات صورت گرفته، عمدتاً بار بحرانی کمانش پوسته‌های استوانه‌ای تحت توزیع فشار مطرح بوده است. با توجه به اهمیت این سازه‌ها در بارگذاری‌های حرارتی، بررسی کمانش این سازه‌ها تحت توزیع دمایی یکنواخت می‌تواند مفید واقع شود. در این مقاله ابتدا بار بحرانی کمانش در اثر توزیع دمایی یکنواخت ارائه می‌شود. ارزیابی و صحت آن با استفاده از نرم‌افزار انسیس انجام می‌شود. سپس به بررسی توزیع دمای لازم جهت کمانش پوسته استوانه‌ای به همراه گشودگی (cut out) در شرایط مرزی مختلف، ابعاد گشودگی مختلف و موقعیت گشودگی مختلف پرداخته می‌شود. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد وجود گشودگی باعث کاهش شدید دمای بحرانی کمانش می‌شود. همچنین ابعاد گشودگی باعث تغییر دمای بحرانی کمانش شده که در بعضی شرایط نقطه بهینه محلی مشاهده می‌شود. با تغییر شرایط مرزی، دمای بحرانی کمانش در حالت دوسرگیردار بیشتر از حالت دوسر تکیه‌گاه ساده محاسبه شده است. همچنین وجود موقعیت گشودگی در وسط طول استوانه در هر دو شرط مرزی باعث وقوع بحرانی ترین دمای کمانش خواهد شد.

واژه‌های کلیدی

پوسته استوانه - کمانش - گشودگی مستطیلی - دمای بحرانی کمانش

مقدمه

مساله کمانش پوسته‌های استوانه‌ای از سال‌ها قبل از این مورد توجه محققین بسیاری قرار گرفته است. تیموشنکو با استفاده از تئوریه کلاسیک برای پیش‌بینی بار کمانش پوسته‌های استوانه‌ای نازک تحت بار فشاری محوری یکنواخت، رابطه زیر را ارائه کرد [۱]:

$$N_{cr} = \frac{E}{3\sqrt{1-\nu^2}} \left(\frac{t^2}{R}\right) \quad (1)$$

که در آن E مدول یانگ، ν نسبت پواسون، t ضخامت پوسته و R شعاع پوسته است. باید توجه داشت که این معادله برای پوسته‌های نازک بدون گشودگی با نسبت $\frac{L}{R} < 5$ جواب مناسبی می‌دهد [۲] (طول استوانه $L=$). این معادله برای پوسته‌های با ضخامت متوسط $\frac{R}{t} < 50$ نیز اغلب مقداری بیشتر از بار کمانش واقعی را نشان می‌دهد، بطوری که پوسته قبل از رسیدن به این بار دچار کمانش می‌شود. بررسی‌هایی روی پوسته استوانه‌ای تحت بارگذاری خمشی و محوری در حالت الاستیک صورت گرفته است از جمله وین‌گارتن و سید [۳] معادله اصلاح یافته دائل و روش گالرکین را برای بدست آوردن تنش کمانش ماکزیمم الاستیک بکار برد. ون داک [۴] توزیع تنش را حول یک سوراخ برای یک پوسته استوانه‌ای با گشودگی تحت بارگذاری محوری، پیچشی و فشار داخلی بدست آورد. تینسون [۵] یک مطالعه تجربی روی تاثیر گشودگی دایره‌ای در کمانش پوسته‌های استوانه‌ای تحت فشار محوری با نسبت شعاع به ضخامت ۱۶۲ تا ۳۳۱ میلی‌متر انجام داد و بار کمانش تجربی بدست آمده را با نتایج تحلیلی مقایسه نمود.

تفرشی [۶] مطالعاتی عددی روی رفتار کمانش و پس‌کمانش پوسته‌های استوانه‌ای کامپوزیتی هشت لایه با گشودگی مستطیلی، تحت بارهای فشاری محوری و فشار داخلی با استفاده از نرم افزار آباکوس انجام داد. او تاثیر اندازه و جهت گشودگی‌ها را مطالعه کرد. هنینگ هان و همکارانش [۷] با استفاده از تحلیل‌های عددی غیر خطی و به کمک نرم افزار انسیس تاثیر ابعاد و موقعیت گشودگی‌های مربعی شکل روی پوسته‌های استوانه‌ای با ضخامت نازک و متوسط، با طول‌های مختلف را بررسی کردند و به کمک آزمایش‌های تجربی نتایج بدست آمده برای پوسته‌های با ضخامت متوسط را مقایسه کردند. شریعتی و مهدی زاده [۸] به شبیه سازی و تحلیل پوسته‌های استوانه‌ای نازک فولادی با طول‌ها و قطرهای متفاوت، دارای گشودگی بیضوی، تحت بار فشاری محوری با استفاده از روش اجزای محدود پرداختند و تاثیر موقعیت گشودگی و نسبت طول به قطر و قطر به ضخامت در رفتار کمانش و پس‌کمانش پوسته‌های استوانه‌ای را بررسی کردند. همچنین برای چندین نمونه، آزمایش کمانش توسط یک دستگاه سروویدرولیک انجام دادند و نتایج بدست آمده از آزمایش‌های تجربی را با نتایج عددی مقایسه کردند. رحیمی و همکارانش [۹] تاثیر گشودگی مربع مستطیل بر رفتار کمانشی سازه‌های مشبک کامپوزیتی استوانه‌ای به روش‌های تجربی و المان محدود را بررسی

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۲- استادیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

۳- هیئت علمی، مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۴- استادیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه تهران، دانشکده علوم و فنون نوین، خیابان کارگر شمالی تلفن: ۰۲۱-۱۱۸۴۴۱-۶۱۱ shahrokh.shams@ut.ac.ir (نویسنده مخاطب)

مقطع بصورت مستطیلی باشد تغییر دمای لازم جهت کمانش ستون از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta T = \frac{\pi^2 t^2}{3\alpha L^2} \quad (7)$$

(t ضخامت) رابطه بار بحرانی کمانش یک پوسته استوانه‌ای تحت بار محوری، همانگونه که در بخش مقدمه ذکر شد، از رابطه (1) محاسبه می‌شود. به‌طور مشابه با برابر قرار دادن طرفین روابط (1) و (6)، تغییر دمای لازم جهت کمانش پوسته استوانه‌ای از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta T = \frac{t^2}{\pi R^3 \alpha \sqrt{3(1-\nu^2)}} \quad (8)$$

ارزیابی مدل‌سازی

در این قسمت مدل‌سازی کمانش ناشی از تغییرات دمای یک ستون جدار نازک با مقطع مستطیلی انجام می‌شود. در این مدل‌سازی از المان shell181 استفاده می‌شود که دارای چهارگره و شش درجه آزادی در هر گره است. در حل این مساله دوسر ستون کاملاً مقید می‌شود. مشخصات ستون به صورت زیر است:

جدول ۱- مشخصات ستون نمونه

L = ۰/۲ m	E=۲۰۰ Gpa
$\alpha = 117 \times 10^{-6}$	$\nu = ۰/۳۳$
t = ۰/۰۰۱ m	b = ۰/۰۱ m

(b عرض ستون) مطابق شکل ۱، مساله در نرم‌افزار انسیس و همچنین از رابطه (7) حل می‌شوند. نتایج حاصل جهت کمانش ستون، با توزیع دمای یکنواخت، بصورت زیر است:

جدول ۲- نتایج ارزیابی تحلیل کمانش ستون (بر حسب درجه سلیسیوس)

تحلیلی	اجزای محدود	درصد اختلاف
۷/۰۲۸	۷/۰۸۲	۰/۰۷

نتایج گرافیکی در شکل ۲ نشان داده شده است.

لازم به ذکر است در این مقاله منظور از دمای بحرانی کمانش، میزان تغییر دمای لازم برای کمانش نسبت به دمای مرجع (T=25°C) می‌باشد.

مدل‌سازی پوسته استوانه‌ای با گشودگی

مشخصات پوسته استوانه مینا در جدول زیر آورده شده است:

جدول ۳- مشخصات استوانه با گشودگی

L = ۰/۳۳ ~ ۱ m	E=۲۰۰ Gpa
$\alpha = 117 \times 10^{-6}$	$\nu = ۰/۳۳$
t = ۰/۰۰۱ m	b = ۰/۰۰۶ ~ ۰/۰۵ m
R = ۰/۰۵ ~ ۰/۲ m	a = ۰/۰۵ m

ابتدا با فرض بدون گشودگی (a,b=0)، مقدار دمای بحرانی کمانش با مشخصات جدول فوق برابر 131/7°C بدست آمد.

کردند. آنها دریافتند که برای مساحت گشودگی ثابت مربع شکل کمترین کاهش در بار بوجود می‌آید و برای شکل مستطیل، بعد بیشتر در جهت شعاعی باعث کاهش بیشتر بار بحرانی می‌گردد. زین‌الدینی و همکارانش [۱۰] کمانش موضعی اعضای لوله‌ای شکل دارای خوردگی تحت بارگذاری‌های تناوبی کشش و فشار را با استفاده از نرم افزار آباکوس بدست آوردند و با نتایج بدست آمده از داده‌های آزمایشگاهی صحت‌سنجی کردند. همچنین اثر دامنه و تنش میانگین در بارگذاری دوره‌ای و تاثیر خوردگی بر نرخ رشد کرنش غیر خطی مورد تحقیق قرار گرفت. عظیمی و خرم [۱۱] پوسته استوانه‌ای فولادی جدار نازک با ابعاد مختلف و با گشودگی مثلثی شکل را بصورت تجربی و عددی تحت بار فشاری محوری قرار دادند و رفتار کمانشی و پس‌کمانشی آن را مورد بررسی قرار دادند و مطابقت خوبی بین آنالیز تجربی و عددی مشاهده کردند. شن شن شی و همکارانش [۱۲] پوسته استوانه‌ای کامپوزیتی فیبر-کربن را با گشودگی دایروی و مستطیلی تقویت شده تحت بار فشاری محوری قرار دادند و رفتار کمانشی آن را به‌صورت عددی بررسی کردند. در انتها پوسته استوانه-ای کامپوزیتی بهینه با گشودگی طراحی شد. قنبری و همکاران [۱۳] به بررسی تجربی کمانش پوسته‌های استوانه‌ای تحت بار محوری با گشودگی‌های درب شکل که نمایانگر درب ورودی به داخل محفظه پوسته بودند، پرداختند. لی چنقو و همکاران [۱۴] به بررسی کمانش ۱۲۰ درجه پوسته استوانه‌ای شکل کامپوزیتی تقویت شده پرداختند. ایشان به‌صورت عددی و تجربی نمونه را مورد بررسی قرار دادند. در این مقاله ابتدا بار بحرانی کمانش در اثر توزیع دمایی یکنواخت ارائه می‌شود. صحت و ارزیابی آن با استفاده از نرم‌افزار انسیس انجام می‌شود. در انتها به بررسی دمای لازم جهت کمانش پوسته استوانه‌ای در شرایط مرزی مختلف، ابعاد گشودگی مختلف و موقعیت گشودگی پرداخته می‌شود.

مبانی تئوری

در این بخش ابتدا با استفاده از روابط پایه، توزیع دمای یکنواخت لازم برای کمانش یک ستون استخراج می‌شود. سپس به‌صورت مشابه روابط برای پوسته‌ای استوانه‌ای استخراج می‌شود. قانون هوک و کرنش حرارتی طبق روابط زیر تعریف می‌شوند:

$$\sigma = \epsilon E \quad (2)$$

$$\epsilon_t = \alpha \Delta T \quad (3)$$

همچنین در صورتی که تنش در اثر فشار ایجاد شود، رابطه زیر برقرار است:

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (4)$$

(P فشار، A سطح مقطع، α ضریب پخش حرارتی، E مدول یانگ، ΔT تغییر درجه حرارت، ϵ کرنش الاستیک، ϵ_t کرنش حرارتی است.) با قرار دادن رابطه (3) در (2) و سپس برابر قرار دادن حاصل این

عمل با رابطه (4)، رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$P_t = EA\alpha\Delta T \quad (5)$$

همچنین رابطه بار بحرانی کمانش یک ستون تحت بار محوری از رابطه زیر بدست می‌آید [۱]:

$$P_{cr} = \frac{n^2 \pi^2 EI}{L_e^2} \quad (6)$$

(I ممان سطح) مقدار طول موثر تیر با توجه به حالت دوسر درگیر بودن آن $L_e = L/2$ انتخاب می‌شود. کمانش در اثر توزیع یکنواخت دما با برابر قرار دادن طرفین روابط (5) و (6) بدست می‌آید. در صورتی که سطح

جدول ۶- تغییر دمای لازم جهت کماتش پوسته استوانه‌ای با تغییر شعاع

در حالت $L=1m$ و $a=b=5cm$ و $a/b=1$		
L/R	تغییر دمای لازم با دوسر ساده برحسب درجه سلیسیوس	تغییر دمای لازم با دوسر کاملاً مقید برحسب درجه سلیسیوس
۲۰	۲۹/۱۵۸	۳۲/۷۹۹
۱۰	۷/۷۰۰	۸/۴۷۵
۶/۶۶	۳/۳۹۸	۳/۶۳۱
۵	۱/۹۱۹	۲/۰۳۱

نمودار تغییر دمای لازم جهت کماتش پوسته استوانه‌ای با تغییر شعاع برای هر دو تکیه‌گاه در شکل ۴ نشان داده شده است. براساس این نمودار با کاهش R (و افزایش L/R) دمای بحرانی کماتش، افزایش می‌یابد.

در قسمت بعدی به بررسی موقعیت گشودگی پرداخته می‌شود. برای این کار پارامتری به بعد C/L تعریف شده است که c موقعیت مرکز گشودگی از ابتدای آن است. تغییرات دمای لازم جهت کماتش پوسته استوانه‌ای با C/L های مختلف برای دو حالت: دوسر کاملاً مقید و دوسر تکیه‌گاه ساده، بررسی می‌شود. با فرض $r=0.05m$ و $a/b=1$ و $a=b=5cm$ و $L=100cm$ ثابت و با استفاده از نتایج بدست آمده از حل اجزای محدود، نتایج زیر به‌دست می‌آیند:

جدول ۷- تغییر دمای لازم جهت کماتش پوسته استوانه‌ای با تغییر موقعیت گشودگی در حالت $r=0.05m$ و $a/b=1$ و $a=b=5cm$ و $L=100cm$

c/L	تغییر دمای دوسر ساده (درجه سلیسیوس)	
	تغییر دمای دوسر کاملاً مقید (درجه سلیسیوس)	تغییر دمای دوسر کاملاً مقید (درجه سلیسیوس)
۰/۱	۲۹/۲۱۱	۳۲/۸۷۵
۰/۲	۲۹/۲۱۳	۳۲/۸۷۷
۰/۳	۲۹/۳۱۴	۳۳/۰۵
۰/۴	۲۹/۳۱	۳۳/۰۵
۰/۵	۲۹/۱۵۸	۳۲/۷۹۹

نمودار تغییر دمای لازم جهت کماتش پوسته استوانه‌ای با تغییر موقعیت گشودگی برای هر دو تکیه‌گاه در شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد در حدود $C/L=0.3$ برای هر دو شرط مرزی، دمای بحرانی کماتش به بیشترین مقدار خود رسیده و در حالتی که گشودگی در مرکز استوانه قرار بگیرد دمای بحرانی کماتش به کمترین و بحرانی ترین مقدار خود می‌رسد.

نتیجه‌گیری

در مقاله حاضر به بررسی کماتش پوسته‌ای استوانه‌ای با گشودگی تحت توزیع یکتواخت دما پرداخته شد. ابتدا در قسمت ارزیابی به‌صورت تئوری و اجزای محدود برای یک ستون، اصول کار صحت سنجی شد. سپس به مدل‌سازی پوسته استوانه‌ای همراه با گشودگی پرداخته شد و تغییر دمای لازم جهت کماتش آن در حالات مختلف محاسبه شد. در ادامه پارامترهایی از قبیل ابعاد گشودگی، اندازه پوسته استوانه‌ای، شرایط مرزی تکیه‌گاه‌ها و

در این قسمت به مدل‌سازی انواع پوسته‌های استوانه‌ای با ابعاد گشودگی مستطیلی مختلف، ابعاد استوانه مختلف و شرایط مرزی دوسر تکیه‌گاه ساده - دوسر کاملاً مقید پرداخته می‌شود. (شکل ۳) سپس توزیع دمای لازم جهت کماتش آنها بررسی می‌شود (شکل ۴).

ابتدا ابعاد گشودگی تغییر داده می‌شود. در این حالت a طول و b عرض گشودگی است. شعاع و طول پوسته استوانه‌ای ثابت و همچنین گشودگی در مرکز فرض می‌شود، سپس با تغییر ابعاد گشودگی، با ثابت نگه داشتن $a=5cm$ و تغییر پارامترهای L, b ، نتایج برای حالت دو شرایط مرزی ذکر شده به‌صورت جداول زیر بدست آورده می‌شوند:

جدول ۴- تغییر دمای لازم جهت کماتش پوسته استوانه‌ای برای حالت دوسر کاملاً مقید با $R=0.05m$

a/L \ a/b	دوسر کاملاً مقید با $R=0.05m$			واحد
	۰/۱۵	۰/۱	۰/۰۵	
۱	۳۲/۳۰۵	۳۲/۴۷۳	۳۲/۷۹۹	تغییر دما (درجه سلیسیوس)
۱/۵	۳۲/۵۳۱	۳۲/۸۰۲	۳۳/۲۶۳	تغییر دما (درجه سلیسیوس)
۲	۳۲/۹۱۴	۳۲/۹۹	۳۳/۰۱۷	تغییر دما (درجه سلیسیوس)
۲/۵	۳۲/۷۹۵	۳۲/۹۳۸	۳۲/۷۰۸	تغییر دما (درجه سلیسیوس)
۳	۳۳/۵۱۳	۳۲/۹۶	۳۲/۷۷۲	تغییر دما (درجه سلیسیوس)

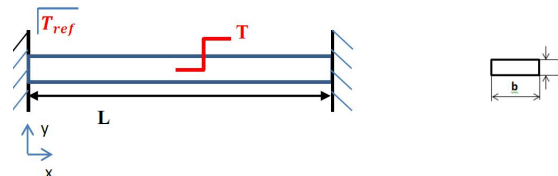
در اینجا دیده می‌شود با کاهش مقدار a و L دمای بحرانی کماتش در حالت‌هایی به ماکزیمم مقدار رسیده است.

جدول ۵- تغییر دمای لازم جهت کماتش پوسته استوانه‌ای برای حالت دوسر تکیه‌گاه ساده با $R=0.05m$

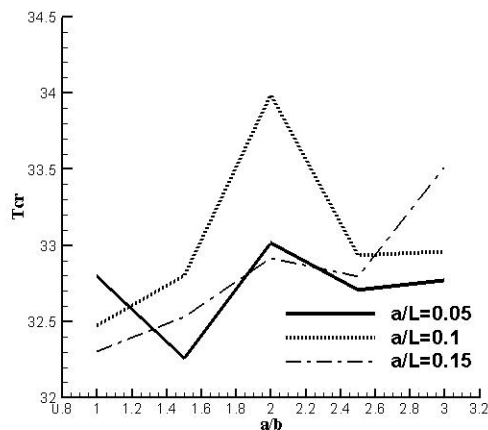
a/L \ a/b	دوسر تکیه‌گاه ساده با $R=0.05m$			واحد
	۰/۱۵	۰/۱	۰/۰۵	
۱	۲۸/۹۳۶	۲۹/۰۲۹	۲۹/۱۵۸	تغییر دما (درجه سلیسیوس)
۱/۵	۲۹/۰۶۴	۲۹/۱۹۲	۲۹/۳۸۵	تغییر دما (درجه سلیسیوس)
۲	۲۹/۲۸۴	۲۹/۶۳	۲۹/۲۴۵	تغییر دما (درجه سلیسیوس)
۲/۵	۲۹/۲۰۸	۲۹/۲۳۳	۲۹/۱۴۹	تغییر دما (درجه سلیسیوس)
۳	۲۹/۴۸۵	۲۹/۲۶	۲۹/۱۷۸	تغییر دما (درجه سلیسیوس)

در اینجا دیده می‌شود با کاهش مقدار a و L دمای بحرانی کماتش در حالت‌هایی به ماکزیمم مقدار رسیده است. با توجه به جداول ۴ و ۵ مشاهده می‌شود دمای لازم جهت کماتش پوسته استوانه‌ای در حالت دوسر تکیه‌گاه ساده اندکی کمتر از حالت دوسر تکیه‌گاه کاملاً مقید است. نتایج جداول فوق به‌صورت نمودار در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده‌اند. در قسمت بعدی به بررسی تغییرات ابعاد خود پوسته استوانه‌ای پرداخته می‌شود. در این قسمت توزیع دمای لازم جهت کماتش پوسته استوانه‌ای برحسب تغییرات L/R در یک گشودگی ثابت $a/b=1$ و $a=b=5cm$ و $L=1m$ به‌دست آورده می‌شود. برای هر دو شرایط مرزی تکیه‌گاه‌ها، نتایج به‌صورت زیر استخراج شدند:

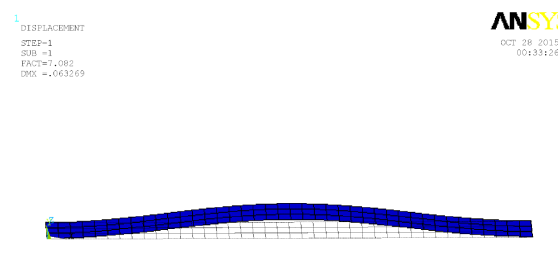
موقعیت گشودگی مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج، دمای بحرانی لازم برای کمانش پوسته استوانه‌ای با دوسر کاملاً مقید، از دمای بحرانی لازم برای حالت دوسر تکیه‌گاه ساده بیشتر است. با بزرگتر شدن شعاع پوسته استوانه‌ای دمای لازم برای کمانش مقدار زیادی کاهش می‌یابد. با بزرگتر شدن ابعاد محیطی گشودگی، دمای بحرانی کمانش در حالی بیشترین مقدار می‌شود و با کاهش طول استوانه درگشودگی ثابت، دمای بحرانی کمانش کاهش می‌یابد. همچنین وجود موقعیت گشودگی در وسط طول استوانه در هر دو شرط مرزی باعث وقوع بحرانی ترین دمای کمانش می‌شود.



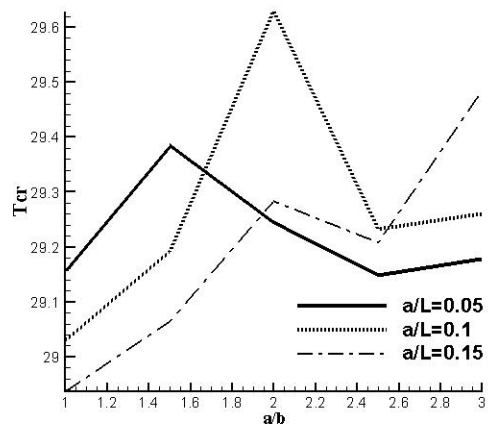
شکل ۱- ستون نمونه در نظر گرفته شده



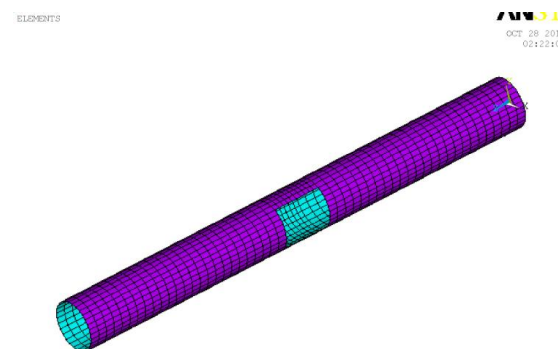
شکل ۵- دمای بحرانی کمانش پوسته استوانه‌ای به ازای ابعاد گشودگی مختلف در حالت تکیه‌گاه دوسر کاملاً مقید



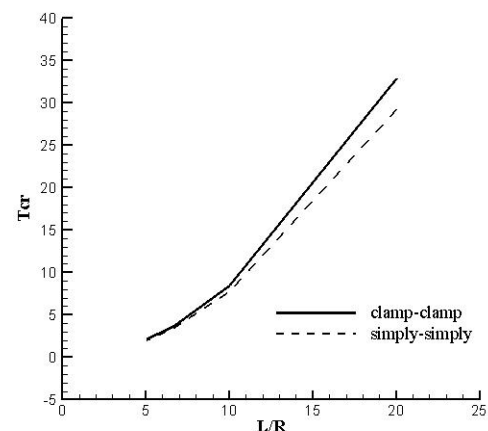
شکل ۲- کمانش ستون دوسر گیردار در اثر توزیع دمای یکنواخت



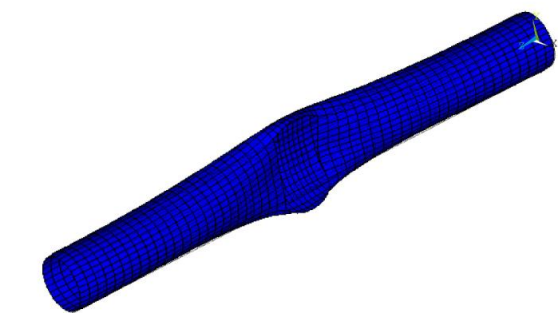
شکل ۶- دمای بحرانی کمانش پوسته استوانه‌ای به ازای ابعاد گشودگی مختلف در حالت تکیه‌گاه دوسر ساده



شکل ۳- پوسته استوانه‌ای مدل شده قبل از کمانش در حالت $R=0.5\text{ m}$ و $a=b=10\text{ cm}$ و $L=1\text{ m}$



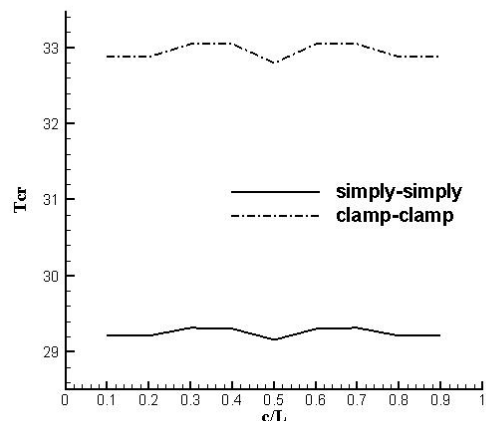
شکل ۷- دمای بحرانی کمانش پوسته استوانه‌ای به ازای ابعاد مختلف پوسته در دو حالت شرایط مرزی تکیه‌گاه‌ها



شکل ۴- پوسته استوانه‌ای کمانش یافته در حالت $R=0.5\text{ m}$ و $L=1\text{ m}$ و $a=b=10\text{ cm}$

۱۱. عظیمی و خرم، "بررسی عددی و تجربی کمانش پوسته‌های جدار نازک استوانه‌ای فولادی با گشودگی‌های مثلثی تحت فشار محوری"، مکانیک مدرس، دوره سیزدهم، شماره ۱، ص ۳۸-۱۴، فروردین (۱۳۹۲).

12. Shi, Shanshan, et al. "Buckling response of advanced grid stiffened carbon-fiber composite cylindrical shells with reinforced cutouts." *Composites Part B: Engineering* 44.1 (2013): 26-33.
13. Ghazijahani, Tohid Ghanbari, Hui Jiao, and Damien Holloway. "Structural behavior of shells with different cutouts under compression: an experimental study." *Journal of Constructional Steel Research* 105 (2015): 129-137.
14. Li, Chenghu, and Zhe Wu. "Buckling of 120° stiffened composite cylindrical shell under axial compression-Experiment and simulation." *Composite Structures* 128 (2015): 199-206.



شکل ۸- دمای بحرانی کمانش پوسته استوانه‌ای به ازای موقعیت گشودگی مختلف در دو حالت شرایط مرزی تکیه‌گاه‌ها

مراجع

1. Timoshenko, Stephen P., and James M. Gere. "Theory of elastic stability" McGrawHill-Kogakusha Ltd, Tokyo (1961).
2. Ugural, Ansel C. *Stresses in plates and shells*. McGraw-Hill Science/Engineering/Math, (1999).
3. Seide, p, and Weingarten V.I, "On the buckling of circular cylindrical shells under pure bending ". *asme j. appl. mech*, vol 28, pp112-116, (1961).
4. Van Dyke, Peter. "Stresses about a circular hole in a cylindrical shell." *AIAA Journal* 3.9 (1965): 1733-1742.
5. Tennyson R. C., "The effects of unreinforced circular cutouts on the buckling of circular cylindrical shells", *journal of engineering for industry*, transactions of the american society of mechanical engineers, vol. 90, pp. 541-546, (1968).
6. Tafreshi A., "Buckling and post-buckling analysis of composite cylindrical shells with cutouts subjected to internal pressure and axial compression loads", *international journal of pressure vessels and piping*, vol. 79, no. 5, pp. 351-359, (2002).
7. Haipeng Han, Cheng J, Taheri F, Pegg N., "Numerical and experimental investigations of the response of aluminum cylinders with a cutout subject to axial compression", *thin-walled structures*, vol. 44, pp. 254-270, (2006).
8. Shariati M., "Numerical and experimental investigations on buckling of steel cylindrical shells with elliptical cutout subject to axial compression", *thin-walled structures*, vol. 46, no. 11, pp. 1251-1261, (2008).
۹. رحیمی غ، رسولی س، ف، "بررسی تاثیر گشودگی مربع مستطیل و ضریب منظر آن بر مقاومت کمانش پوسته استوانه‌ای مشبک کامپوزیتی"، دهمین همایش انجمن هوافضای ایران، تهران، (۱۳۸۹).
۱۰. زین الدینی م، پیکانو م، " شبیه سازی عددی کمانش موضعی اعضای لوله‌ای دارای خوردگی تحت بارگذاری‌های تناوبی کشش و فشار"، عمران مدرس، دوره یازدهم، شماره ۴، ص ۹۷-۱۰۴، (۱۳۹۰).